



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Distribución del tamaño de partículas en material rocoso y su
relación con el Índice de Carga Puntual”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERA EN MINAS

Autoras:

JESSICA ADRIANA PERALTA DELGADO

ANDREA SUSANA TAMAYO FÁREZ

Director:

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA - ECUADOR

2022

DEDICATORIA

Lleno de regocijo, de amor y esperanza, dedico este trabajo de tesis a Dios y cada uno de mis seres queridos, que han sido mi apoyo durante toda mi carrera universitaria.

Es para mí una gran satisfacción poder dedicarles a ellos, que con mucho esfuerzo, dedicación y esmero me lo he ganado.

A mis hermanos Freddy, Erika y Fernando a quienes admiro y respeto mucho, gracias por el apoyo y las enseñanzas entregadas durante mi vida profesional como personal. Especialmente este trabajo lo dedicado a mis padres, que sin importarles los obstáculos que se presentaron durante mi carrera, nunca dejaron de apoyarme. Gracias por creer en mí y por ser el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional.

Quiero dedicar también este logro a mis amigos que sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, sus alegrías y tristezas, que durante estos cinco años estuvieron a mi lado apoyándome.

Jessica Adriana Peralta Delgado

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento de mi vida y sobre todo por darme salud para poder alcanzar mis objetivos tanto personales como profesionales.

A mis padres Laura y Vinicio, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, valores y motivación constante que me han convertido en una persona de bien, por sus ejemplos de perseverancia y constancia que los caracteriza y que me lo han infundado, pero sobre todo por su amor incondicional.

A mi hermana Paola a quien admiro y respeto, por ser un ejemplo a seguir, por su apoyo moral a lo largo de mi vida y por compartir momentos especiales conmigo. A toda mi familia que es un pilar importante en mi vida, quienes con sus oraciones, palabras y consejos de aliento me hicieron una mejor persona y que me acompañan en la realización de mis sueños y metas.

A mis amigos por apoyarme en mi formación profesional, por compartir buenos momentos y aprender unos de otros tanto profesional como personalmente, en general por darme ánimo y consejos durante mi vida universitaria.

Andrea Susana Tamayo Fárez

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios, por darnos la fortaleza necesaria en los momentos de debilidad, por guiarnos y acompañarnos a lo largo de carrera universitaria. A nuestros seres queridos por brindarnos su apoyo incondicional y sobre todo por ser un ejemplo a seguir.

Nuestro profundo agradecimiento a nuestros docentes por compartir con nosotras conocimientos, experiencias, tiempo y consejos necesarios para poder concluir nuestra carrera universitaria.

Muchas gracias a todos nuestros amigos por su apoyo, cariño, tiempo y paciencia para el logro de nuestros objetivos y metas propuestas.

Finalmente, un agradecimiento especial a nuestro director de tesis el Ingeniero Patricio Feijoo, quien con sus conocimientos y apoyo nos supo guiar a través de este proyecto para poder alcanzar los resultados buscados.

Andrea Susana Tamayo Fárez, Jessica Adriana Peralta Delgado

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	3
MARCO TEÓRICO	3
1.1. Génesis de las muestras	3
1.1.1. Andesitas	4
1.2. Geología local.....	5
1.3. Propiedades de las rocas.....	6
1.3.1. Densidad.....	6
1.3.2. Porosidad.....	6
1.3.3. Absorción	7
1.3.4. Dureza	8
1.3.5. Resistencia.....	8
1.3.6. Elasticidad	8
1.3.7. Abrasividad	9
1.3.8. Permeabilidad.....	9
1.4. Resistencia a la compresión simple.....	9
1.4.1. Índice de carga puntual	11
1.5. Trituración	13
1.5.1. Trituración primaria	14
1.6. Distribución granulométrica.....	15

1.6.1.	Métodos de análisis granulométrico.....	16
1.6.2.	Método de análisis granulométrico por tamizado	17
1.6.3.	Representación de distribución de tamaño de partículas	18
CAPÍTULO 2.....	20	
EXPERIMENTACIÓN	20	
2.1.	Numero de muestras y preparación	20
2.2.	Determinación del índice de carga puntual	21
2.2.1.	Proceso de ruptura de las muestras	22
2.2.2.	Fórmulas para determinar el índice de carga puntual	24
2.3.	Trituración.....	24
2.4.	Determinación de la distribución granulométrica	27
2.4.1.	Elaboración de las curvas granulométricas	29
2.4.2.	Determinación del d (80) de alimento.....	34
CAPÍTULO 3.....	35	
ANÁLISIS DE RESULTADOS	35	
3.1.	Análisis de resultados del índice de carga puntual en roca	35
3.2.	Caracterización de la distribución granulométrica del material	37
3.2.1.	Análisis de resultados de modelos de distribución	39
3.3.	Interpretación y análisis de los datos obtenidos	41
CONCLUSIONES.....	45	
RECOMENDACIONES.....	46	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de ubicación geográfica.....	3
Figura 1.2 Compresión simple.....	10
Figura 1.3 Máquina de compresión Humboldt.....	11
Figura 1.4 Trituradora de mandíbulas R22.....	15
Figura 1.5 Mallas de tamices.....	16
Figura 1.6 Método de Hidrómetro.....	16
Figura 1.7 Serie de tamices.....	17
Figura 1.8 Curva granulométrica de un suelo areno-limoso, representado en un papel "log-normal".....	18
Figura 2.1 Muestras enviadas al laboratorio de civil.....	21
Figura 2.2 Puntas cónicas de la prensa Humboldt.....	21
Figura 2.3 Máquina Humboldt.....	22
Figura 2.4 Muestra en las puntas cónicas.....	22
Figura 2.5 Muestra que será sometida a compresión simple.....	23
Figura 2.6 Enumeración de las probetas.....	25
Figura 2.7 Peso de la muestra.....	25
Figura 2.8 Proceso de trituración.....	26
Figura 2.9 Obtención de los fragmentos de la muestra.....	26
Figura 2.10 Serie de tamices.....	27
Figura 2.11 Peso de cada tamiz con material.....	28
Figura 2.12 Curva granulométrica de la muestra 1T9.....	31
Figura 2.13 Curva granulométrica del método de Schuhmann de la muestra 1T9...33	33
Figura 3.1 Curvas granulométricas de las 30 muestras del material rocoso.....	38
Figura 3.2 Curva granulométrica del método de Schuhmann de la muestra 1T9.....	39
Figura 3.3 Correlación entre el índice de carga puntual $I_s (50)$ y el d_{80}	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de la dureza de las rocas.....	8
Tabla 1.2 Clasificación de las rocas según la resistencia a la compresión uniaxial..	11
Tabla 1.3 Rango de operación de la fragmentación.....	14
Tabla 2.1 Medidas Muestras 9x10x10 cm.	20
Tabla 2.2 Fuerza Muestras 9x10x10 cm.	23
Tabla 2.3 Abertura de tamices.....	27
Tabla 2.4 Peso de los tamices vacíos.	28
Tabla 2.5 Modelo de tabla para el análisis granulométrico.....	30
Tabla 2.6 Método de Schuhmann de la muestra 1T9.....	32
Tabla 3.1 Resultados Is (50) Muestras 9x10x10 cm.	36
Tabla 3.2 Abertura de tamices.....	37
Tabla 3.3 Clasificación granulométrica de la muestra 1T9.....	37
Tabla 3.4 Método de Schuhmann de la muestra 1T9.....	39
Tabla 3.5 Determinación del d (80) de las 30 muestras de material rocoso.	41
Tabla 3.6 Datos obtenidos del índice de carga puntual Is (50) y el d (80).....	42

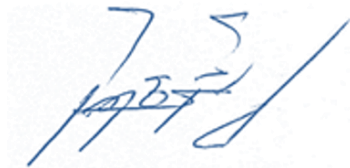
“DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN MATERIAL ROCOSO Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL”

RESUMEN

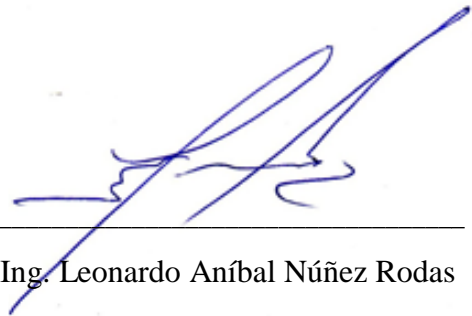
La presente investigación tuvo como objetivo determinar la correlación existente entre la distribución granulométrica y el índice de resistencia a la carga puntual. Para el desarrollo de este estudio se recolectaron muestras de roca tipo andesita pertenecientes a la zona del Cojitambo, en la provincia de Cañar.

Se elaboraron 60 muestras con dimensiones de 9x10x10 cm, las cuales fueron clasificadas en dos grupos, las 30 primeras muestras fueron sometidas a ruptura o fracturamiento mediante la utilización de puntas cónicas utilizando una prensa Humboldt, con lo cual se obtuvo el índice de la resistencia a la carga puntual I_s (50), en las otras 30 muestras se realizaron procesos de trituración y clasificación granulométrica, para poder determinar el d_{80} . Finalmente se obtuvo una gráfica, que determinó la correlación entre los parámetros descritos.

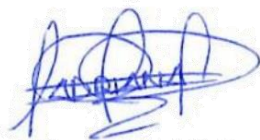
Palabras clave: Distribución granulométrica, d_{80} , I_s (50), andesita, correlación



Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle
Director del Trabajo de Titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Jessica Adriana Peralta Delgado
Autora



Andrea Susana Tamayo Fárez
Autora

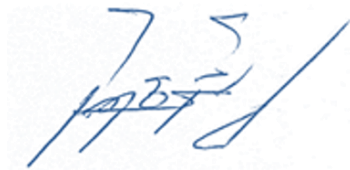
**“DISTRIBUTION OF PARTICLE SIZE IN ROCKY MATERIAL AND ITS
RELATIONSHIP WITH THE POINT LOAD INDEX”**

ABSTRACT

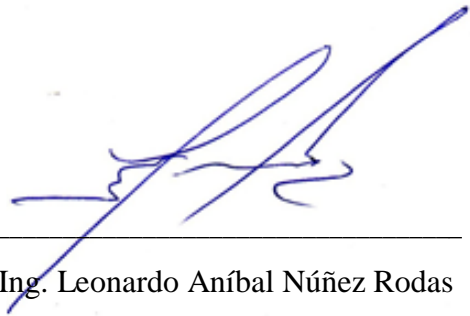
This research had as its most important objective to set the correlation between particle size distribution and point load resistance index. For the development of this study, we collected some samples of andesite-type rock from Cojitambo in Cañar province.

Sixty samples have been used in this research. They were 9x10x10 centimeters. Then they were classified into two groups. The first 30 samples were broken using conical tips and a Humboldt Press that made it possible to obtain the point load resistance index I_s (50). In the other 30 samples, crushing and granulometric classification processes were carried out in order to determine the d_{80} index. Finally, a graph was obtained, which determined the correlation between the parameters described.

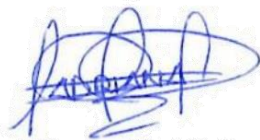
Key words: Particle size distribution, d_{80} , I_s (50), andesite, correlation.



Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle
Director of the Degree Project



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinator of the School



Jessica Adriana Peralta Delgado
Author



Andrea Susana Tamayo Fárez
Author



Jessica Adriana Peralta Delgado

Andrea Susana Tamayo Fárez

Trabajo de Titulación

Ing. Patricio Feijoo Calle

Mayo, 2022

“DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN MATERIAL ROCOSO Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL”

INTRODUCCIÓN

En labores de minería para determinar ciertos parámetros es importante conocer las características del material rocoso, por lo cual es necesario la realización de ensayos ya sea en campo o en laboratorio. Uno de los parámetros más importantes es la resistencia a la compresión del material rocoso para poder determinar su caracterización.

Para el análisis de la resistencia de las rocas en una explotación minera, es necesario enviar algunas muestras a un laboratorio para los respectivos análisis, esto provoca un gasto económico adicional a la mina y un retraso al avance de la explotación, pues los resultados demoran mucho tiempo en ser enviados.

Para evitar estos problemas, la presente investigación determinó la correlación entre la distribución granulométrica y el índice de resistencia de carga puntual $I_s(50)$, para determinar la resistencia de la roca, con el fin de que, si los datos obtenidos de esta correlación están entre los rangos determinados previamente, se obtendrá la resistencia de la roca, lo cual evitará el envío de muestras al laboratorio y permitirá que la explotación se ejecute de una manera más rápida.

Esta investigación procura demostrar que esta relación se puede realizar en la mina, ya que para estos ensayos es necesario la utilización de equipos como una trituradora de mandíbulas y un juego de tamices, lo cual muchas de las minas las disponen. Con estos equipos se podrá realizar la trituración y la clasificación granulométrica, para poder determinar el d_{80} , una vez obtenido este dato, se determinará la correlación

entre el d80 y el índice de resistencia de carga puntual I_s (50) de la roca andesita perteneciente a la zona de Cojitambo.

Finalmente, se obtendrá una ecuación que corresponda a la correlación entre los parámetros descritos anteriormente que servirá como una alternativa eficiente para poder clasificar los macizos rocosos.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Génesis de las muestras

El sitio de estudio de esta investigación se encuentra ubicado en la provincia de Cañar, cantón Azogues, parroquia Cojitambo, la cual cuenta con una superficie de 42 km². Las coordenadas del área de estudio son 2°45'00"S y 78°52'00"O.

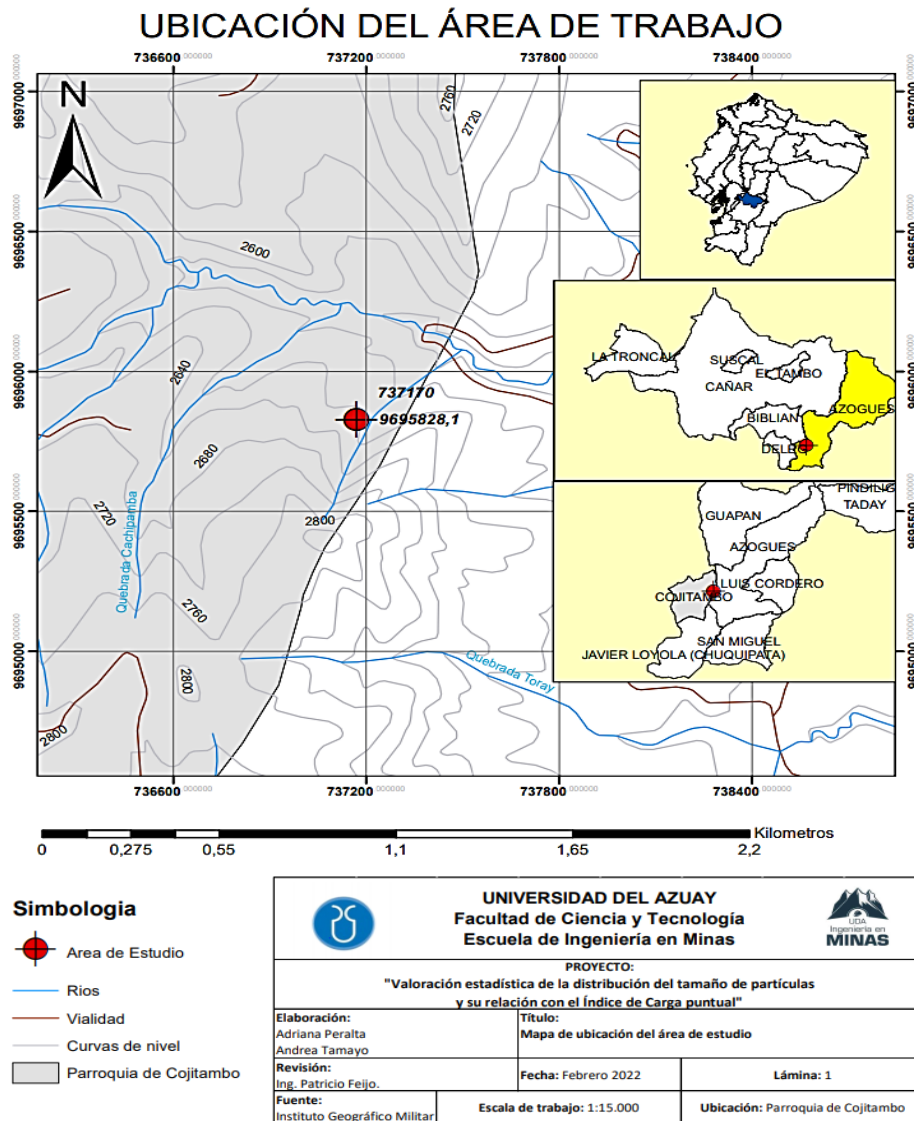


Figura 1.1 Mapa de ubicación geográfica.

Fuente: Elaboración Propia.

El cerro Cojitambo es una formación de roca volcánica que se levanta en medio de la arenisca de Azogues. Cuando se hundieron las capas de la formación sedimentaria a

su lado, perdió su apoyo y desgajó una gran parte de su cumbre, de manera que ahora se presenta como una muralla tajada de ese lado. Los pedazos de andesita se acumularon en su mayor parte al pie del cerro y algunos rodaron sobre las faldas del terreno adyacente encontrándose ahora esparcidos por los campos y hasta el pueblo de Chuquipata. (Bedoya, 1961).

El cerro Cojitambo presenta una variedad típica y hermosa de la andesita anfibólica; en la masa fundamental microcristalina de un color gris claro, se distinguen perfectamente bien los cristalitos de anfíbol, mica negra y los fragmentos más grandes de la plagioclasa (andesina) blanca; con la aguja magnética se comprueba también la presencia de la magnetita que no falta en casi ninguna variedad (Bedoya, 1961).

Entre otras características más de la zona se observa la presencia de materiales de valor explotable como las mismas rocas volcánicas de andesita, las cuales son utilizadas para elaborar adoquines para los pavimentos de las calles de Cuenca y Azogues, además de que se pueden construir edificios o fachadas con este mismo material. Además, existe una variedad de minerales como por ejemplo mármoles, arenas auríferas, tobas, carbón de piedra y mercurio (Bedoya, 1961).

1.1.1. Andesitas

Las muestras de la zona de estudio son rocas andesitas, de origen ígneo, de color gris medio, de grano fino y de origen volcánico. El feldespato plagioclasa es la sustancia que más predomina en la composición de la andesita, aunque también contiene feldespato alcalino y cuarzo en pequeñas cantidades. Esta roca puede contener hasta un 10% de sílice. Su nombre procede de los Andes de América del Sur, donde numerosos volcanes están formados por este tipo de roca. Además de los volcanes de los Andes, muchas de las estructuras volcánicas que rodean el océano Pacífico son de composición andesítica. La andesita muestra frecuentemente una textura porfídica, cuando este es el caso, los fenocristales suelen ser cristales claros y rectangulares de plagioclasa o cristales negros y alargados de anfíbol. La andesita se parece a menudo a la riolita debido a su composición; sin embargo, la andesita contiene cantidades pequeñas de cuarzo, mientras que la riolita está compuesta de aproximadamente un 25 % de cuarzo (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La andesita tiene una alta porosidad, es por ello que su coeficiente de saturación es relativamente bajo. Tiene un alto coeficiente de resistencia a las heladas; sin embargo, son muy vulnerables a la cristalización de sales. (Iñiguez, 2020)

1.2. Geología local

En la zona de estudio se encuentra la Formación Biblián, la cual se encuentra al este del Cojitambo y forma parte del anticlinal de Azogues. Está formada por arcillolitas limosas y arenosas de color rojo a rojo púrpura, las cuales varían de finas a gruesas, además de una secuencia de lutitas verdes, amarillentas y rojizas que están intercaladas por areniscas finas y aglomeradas con clastos semi angulares y redondeados, también presenta intrusiones de rocas andesíticas. (Ureña, 2021).

Esta formación corresponde a los primeros sedimentos detríticos continentales del Terciario (Gonzaga, 2018). Es una manifestación ígnea, que atraviesa los sedimentos por zonas de fracturas y descansa sobre la formación Célica.

También se encuentra la Formación Loyola que aflora a cada lado del anticlinal de Biblián, está formada principalmente por lutitas de color gris oscuro a negro, las cuales están cubiertas con limonita, cuando está meteorizada posee una coloración amarillenta, pero cuando está en estado fresco es de color negro a café, presenta intercalaciones de granos de areniscas finas. La base está formada por areniscas, aglomerados y conglomerados. (Roura, 2010).

Por último, se encuentra la Formación Azogues que está en superposición con la Formación Loyola en la base. Está formada por una secuencia de areniscas tobáceas de color café, de grano medio a grueso, con capas de limonitas, arcilla y lutita con pequeñas intercalaciones, también está constituida con ciertos niveles de conglomerados. (Verdezoto, 2006). Como consecuencia de la deformación que han experimentado estas rocas, se presentan frecuentemente diaclasadas, es decir, rellenas de calcita y yeso. (Roura, 2010).

Las areniscas de esta formación sobrepasan las formaciones Loyola y Biblián para finalmente descansar discordantemente sobre la Formación Yunguilla.

1.3. Propiedades de las rocas

Las propiedades de un material se pueden definir como aquella serie de características que determinan el comportamiento de ese material ante las acciones físicas, químicas, mecánicas y estímulos externos como: calor, luz, fuerzas, el ambiente, etc, siendo dichas propiedades las que diferencian a un material de otro y lo que determina que un objeto esté fabricado de un material determinado (Perez Pinto, 2015).

Las propiedades de los materiales se clasifican como físicas, químicas y mecánicas. Entre las propiedades físicas incluyen: la densidad, la permeabilidad, la porosidad, la capacidad calorífica, la conductividad, etc. Dentro de las propiedades químicas tenemos la resistencia a las soluciones ácidas y alcalinas, la corrosión la oxidación, entre otras. Por último, las propiedades mecánicas son la tensión, la flexión, la dureza, el impacto, etc. A continuación, se presenta algunas propiedades importantes de los materiales.

1.3.1. Densidad

Es un parámetro físico que depende de la composición mineralógica y de la porosidad. Es una propiedad fundamental y elemental de los materiales, está relacionada con la naturaleza de sus constituyentes y la existencia de espacios vacíos entre ellos. Se puede definir la densidad (ρ) como la masa (M) por una unidad de volumen (V).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Conociendo esos dos términos se puede determinar de manera directa la densidad de un material. En materiales porosos la masa y el volumen tienen ciertas matizaciones y en consecuencia se pueden distinguir distintos tipos de densidad como por ejemplo la densidad de los granos minerales, la densidad de la roca seca, la densidad de la roca húmeda y la densidad corregida. (Rodríguez, 2010).

1.3.2. Porosidad

Se define como la razón entre el volumen de los espacios vacíos de la roca (V_v) y el total del volumen aparente de la roca (V_t).

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (2)$$

La porosidad está relacionada directamente con la deformación de la roca, puesto que la presencia de poros afecta a las características mecánicas de la misma ocasionando algunas zonas de debilidad en la roca. (Galván & Restrepo, 2016).

Los espacios vacíos contemplados pueden considerar algunos tipos de porosidad como porosidad cerrada o accesible a un fluido para un determinado comportamiento. La porosidad total es el volumen total de vacíos, en el cual se deben considerar todos los espacios vacíos presentes ya sean abiertos, cerrados, accesibles y no accesibles, por una unidad de volumen total de la roca. Su determinación se realiza de forma indirecta a partir del valor de la densidad de los granos minerales (ρ_s) y la densidad de la roca seca (ρ_d). (Rodríguez, 2010)

$$n = \frac{(\rho_s - \rho_d)}{\rho_s} \times 100 \quad (3)$$

1.3.3. Absorción

Es la propiedad que poseen las rocas de absorber o retener una sustancia por las moléculas que posee otra, ya sea en estado líquido o gaseoso. En química la absorción consiste en el proceso de separar uno o más componentes de un gas utilizando un solvente líquido que permite crear una solución, dependiendo del tipo de solvente utilizado, las condiciones de circulación de las fases y de la velocidad a la que se dé la reacción química, la columna de absorción adoptará una configuración. La reacción química suele ser de tipo reversible, por lo que se podrá recuperar el disolvente empleado.

El proceso de absorción física consiste en eliminar un componente de interés que está presente en una corriente gaseosa, utilizando un disolvente líquido, la diferencia entre el proceso de absorción química es que en este proceso no existe una reacción química, sino una transferencia de materia entre la fase gaseosa y fase líquida. Este tipo de proceso solo es aplicable cuando la presión del gas y la concentración del contaminante son altas. (Verdezoto K. , 2020)

1.3.4. Dureza

Esta propiedad depende de la composición de los granos, minerales constituyentes, porosidad, humedad, etc, que tiene cada roca. Está ligada a la resistencia de la superficie de un mineral, la misma que no debe ser superada para no ser rayada o para que no se pueda romper. Por medio de la escala de Mohs se clasifica la dureza de las rocas. (Bustamente & Guillén, 2020)

Tabla 1.1 Clasificación de la dureza de las rocas.

Clasificación	Dureza MOHS	Resistencia a la compresión (MPa)
Muy dura	+7	+200
Dura	6-7	120-200
Medio dura	4.5-6	60-120
Medio blanda	3-4.5	30-60
Blanda	2-3	10-30
Muy blanda	1-2	-10

Fuente: (Linan, 1994).

1.3.5. Resistencia

Es la propiedad que poseen las rocas para oponerse a la destrucción de la misma, al estar sometida a una fuerza o carga exterior, la misma que puede ser dinámica o estática. Depende principalmente de la fragilidad de las rocas, pues en el caso de que existan defectos o irregularidades, la roca puede presentar una mayor o menor resistencia a la compresión, también depende de la composición mineralógica, ya que, si los tamaños de los cristales son grandes, su resistencia disminuye. (Linan, 1994)

1.3.6. Elasticidad

Esta propiedad de las rocas depende de tres factores que son: la homogeneidad, la isotropía y la continuidad, las cuales se describirán a continuación.

La homogeneidad está proporcionada por los constituyentes de la roca que están distribuidos de modo que un pequeño fragmento tenga las propiedades que posee toda la roca. (Canoba & Fraga, 2004)

La isotropía es una propiedad direccional de un material que consiste en que su comportamiento sea el mismo independientemente de la dirección que se considere.

La continuidad es tomada solo para dar una consideración a la cantidad de diaclasas y fallas presentes en un cuerpo rocoso, esta puede afectar las tensiones en la roca de acuerdo al grado de continuidad que la roca tenga. (Canoba & Fraga, 2004)

Con estos factores descritos anteriormente se puede realizar una estimación de la elasticidad que posee una roca o un material.

1.3.7. Abrasividad

Esta propiedad se da durante el proceso de rozamiento de las rocas y la capacidad de las mismas para desgastar la superficie de otra roca considerada más dura. Algunos de los factores para que aumente la capacidad abrasiva de las rocas son: la dureza de los granos que conforman la roca, la forma de los granos, el tamaño de los granos, la porosidad de la roca, la heterogeneidad, etc. (Viggiano-Guerra, 2015)

1.3.8. Permeabilidad

Es la capacidad que tienen las rocas para dejar atravesar un fluido cuando están sometidas a un gradiente hidráulico, esta propiedad está regida por la Ley de Darcy. La interpretación de cálculo de esta propiedad tiene dos valencias positiva y negativa, pues en el agua subterránea conviene que sea de una gran magnitud, mientras que en el ambiente constructivo es bueno que sea baja o nula. (Torrija & Franch, 2008)

1.4. Resistencia a la compresión simple

“La resistencia a compresión simple (o compresión uniaxial) de la matriz rocosa, es el valor que se obtiene cuando se aplica una carga de compresión en una dirección

dada, sin aplicar ningún otro esfuerzo en ninguna otra dirección” (Galván, 2015, p. 26). Se suele expresar con los símbolos C_o ó σ_c :

$$C_o = \frac{P}{A} \quad \text{ó} \quad \sigma_c = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Donde:

- P: Carga de rotura.
- A: Sección sobre la que se aplica.

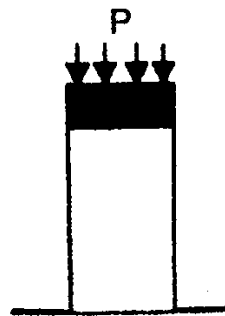


Figura 1.2 Compresión simple.

Fuente: (Galván Ceballos, 2015).

La resistencia a la compresión simple de las rocas es el parámetro más común para definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso. Su obtención en ensayos de laboratorio requiere muestras cuidadosamente preparadas y de un tiempo considerable para conocer su resultado, lo que puede representar un alto costo (Feijoo & Padrón, 2020, p.62).

La resistencia a la compresión simple se estima mediante los ensayos de resistencia de compresión uniaxial empleando en este caso la máquina de compresión Humboldt, que básicamente consiste en aplicar una fuerza axial a una probeta prediseñada anteriormente la cual posee una forma paralelepípeda, con la fuerza ejercida esta probeta de la matriz rocosa deberá llegar a su punto de ruptura (Galván & Restrepo, 2016).



Figura 1.3 Máquina de compresión Humboldt.

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente, la resistencia a la compresión simple es uno de los métodos fundamentales para establecer la clasificación de las rocas desde el punto de vista ingenieril, a continuación, en la tabla 1.2, se muestra una clasificación de las rocas según la resistencia a la compresión uniaxial.

Tabla 1.2 Clasificación de las rocas según la resistencia a la compresión uniaxial.

Descripción	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	Ejemplos de roca
Resistencia muy baja	1 - 25	Yeso, sal de roca
Resistencia baja	25 - 50	Carbón, limolita, esquisto
Resistencia media	50 - 100	Arenisca, pizarra, lutita
Resistencia alta	100 - 200	Mármol, granito, gneis
Resistencia muy alta	> 200	Cuarcita, gabro, basalto

Fuente: (Feijoo, 1997).

1.4.1.  ndice de carga puntual

(Burbano & García, 2016) afirman que: “en los últimos años, se han desarrollado diferentes métodos indirectos para la estimación de la resistencia a la compresión simple entre los que destaca el ensayo de carga puntual” (p. 14).

El ensayo de carga puntual también conocido como Point Load Test (PLT), es un método que se utiliza para la estimación de la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca o testigos cilíndricos de sondeos, a partir del índice de carga puntual (I_s).

El ensayo consiste en aplicar una fuerza axial a una probeta que en este caso está diseñada de forma paralelepípeda, que se coloca entre dos puntas cónicas metálicas, con la fuerza ejercida la probeta llegara a un punto de ruptura permitiendo definir su índice de carga puntual. Se suele expresar con el símbolo (I_s):

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (5)$$

Donde:

- P: Carga de ruptura.
- D: Diámetro de probeta.

La longitud del testigo debe ser, como mínimo 1,5 veces el diámetro. La correlación entre el I_s y la resistencia a compresión simple de la roca (σ_c) es:

$$\sigma_c = 23 \times I_{s50} \quad (6)$$

En el caso de que se realicen ensayos de carga puntual con probetas cilíndricas o probetas no cilíndricas, se define el índice de carga puntual con la siguiente ecuación:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (7)$$

Donde

- P: Carga de ruptura
- D: Diámetro equivalente de probeta

El diámetro equivalente se obtiene a partir de las dimensiones de la probeta, expresada en la siguiente ecuación:

$$D_e^2 = \frac{4}{\pi} * W * D \quad (8)$$

Donde:

- W: Ancho de la probeta
- D_e : Distancia entre las puntas cónicas al realizar la ruptura

Cuando se dispone de probetas de diferentes dimensiones a 50 mm, se recomienda realizar una corrección, permitiendo encontrar el factor de corrección F por tamaño paramétrico, indicador para la estimación del índice de carga puntual $I_{s(50)}$. Se suele expresar mediante la siguiente ecuación:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (9)$$

Donde

- F: Factor de corrección por tamaño
- D_e : Distancia entre las puntas cónicas al realizar la ruptura. (Quevedo & Reyes, 2019).

Por tanto, el índice de resistencia a la carga puntual se obtiene como:

$$I_{s(50)} = I_s * F \quad (10)$$

1.5. Trituración

La trituración de un material desempeña un papel muy importante en el tratamiento y elaboración de materias primas de múltiples tipos. Es el proceso por el cual, se da “La reducción de materiales comprendidos entre los tamaños de entrada que pueden ir desde 1 m de diámetro hasta 1 cm de diámetro” (Ureña, 2021).

“Durante la trituración, las fuerzas de compresión que actúan sobre las partículas pueden llegar a producir aglomerados que reducen la capacidad del equipo, por lo tanto este proceso generalmente se realiza en seco y evitando la presencia de cualquier aglomerante” (Eslava, 2015).

Según el tamaño de entrada de la partícula se diferencian diversos tipos de trituración los cuales son:

- Trituración primaria
- Trituración secundaria
- Trituración terciaria
- Molienda

Tabla 1.3 Rango de operación de la fragmentación.

	Tamaño de entrada	Tamaño de salida
Trituración primaria	Trozos grandes	< 100 mm
Trituración secundaria	< 100 mm	< 25 mm
Trituración terciaria	< 25 mm	< 10 mm
Molienda	< 10 mm	Tamaño final

Fuente: (Bustamente & Guillén, 2020).

1.5.1. Trituración primaria

La trituración primaria recibe, normalmente, el todo-uno o mineral bruto de la explotación minera y realiza la primera reducción de tamaño. Los equipos utilizan preferentemente las fuerzas de compresión y las de impacto o percusión (Blanco, 2014).

La trituración primaria es la etapa, en donde se realiza la primera fragmentación del mineral bruto, es decir, se tritura el mineral (rocas máximo de 60" o 150 cm) hasta un producto de 8" a 6" (20 a 15 cm) (Bustamente & Guillén, 2020).

Los equipos característicos para la realización de este trabajo son de tres tipos, caracterizados por la forma en que aplican la fuerza necesaria para la fragmentación (Blanco, 2014).

- Quebrantadoras, machacadoras o trituradoras de mandíbulas.
- Trituradoras giratorias.
- Otros equipos, trituradores de choque, de impacto y de percusión.

1.5.1.1. Quebrantadoras, machacadoras o trituradoras de mandíbulas

“Estos equipos utilizan como fuerza predominante la compresión y la aplican de forma discontinua por atrapamiento entre dos mandíbulas, una fija y otra móvil mediante diferentes sistemas de actuación. Pueden ser de simple o de doble efecto” (Blanco, 2014)



Figura 1.4 Trituradora de mandíbulas R22.

Fuente: Elaboración propia.

1.6. Distribución granulométrica

Se denomina distribución granulométrica a todo proceso manual, mecánico, microscópico, difracción de rayos láser, difracción de rayos x, entre otros, por medio del cual se pueden clasificar las partículas según sus tamaños (Barrientos, 2017, p. 4).

La distribución granulométrica de un material es un análisis de la distribución de tamaño de los elementos particulados, considerándose uno de los métodos más económicos y confiables por su proceso fácil que consume poco tiempo. A lo largo de los años la distribución granulométrica ha servido como un parámetro o criterio de aceptación de suelos para ser utilizados en diferentes procesos ingenieriles, industriales, etc.

1.6.1. Métodos de análisis granulométrico

Los métodos clásicos más recomendados para obtener la distribución granulométrica de un material por su alta presión son los análisis mecánicos e hidrómetros. Los dos métodos mencionados se utilizan en base al tamaño de partículas del material, en primera instancia el método mecánico analiza la distribución granulométrica de suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm, mediante la utilización de una serie de tamices normalizados, numerados y dispuestos en orden decreciente como se ilustra en la figura 1.5.

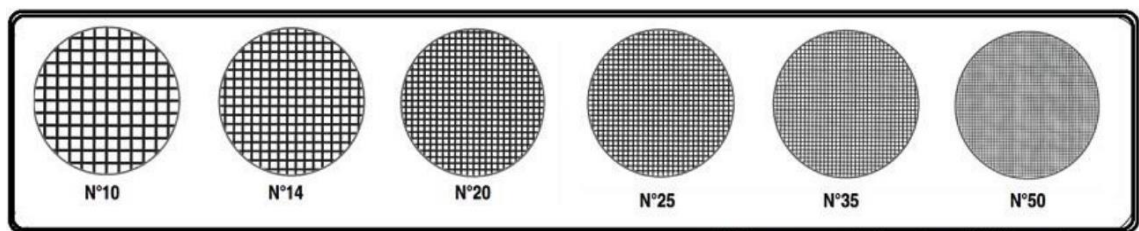


Figura 1.5 Mallas de tamices.

Fuente: Blog Apuntes Ingeniería Civil.

Por el contrario, el método hidrómetro analiza la distribución granulométrica de suelos inferiores a 0,074 mm, mediante la aplicación de la ley de Stokes.

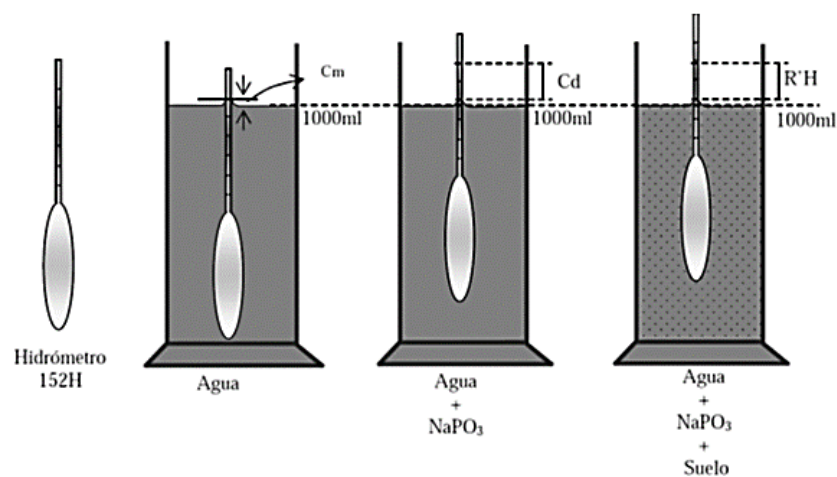


Figura 1.6 Método de Hidrómetro.

Fuente: La librería del ingeniero.

1.6.2. Método de análisis granulométrico por tamizado

La separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños, resulta necesaria para conocer su competencia y eficiencia, desde la perspectiva geotécnica (Ureña, 2021). A partir de esta necesidad surge una forma de medir los tamaños de partículas de un material mediante su paso por tamices que poseen mallas de distintas aperturas dispuestos en orden decreciente. El primer tamiz es el que posee la malla de apertura de mayor tamaño hasta llegar al último tamiz con malla de apertura de menor tamaño, con esta serie de tamices y conjuntamente con el accionamiento mecánico el material atraviesa la luz de tamiz (apertura) quedando retenido en cada tamiz distintas fracciones de tamaño de partículas.

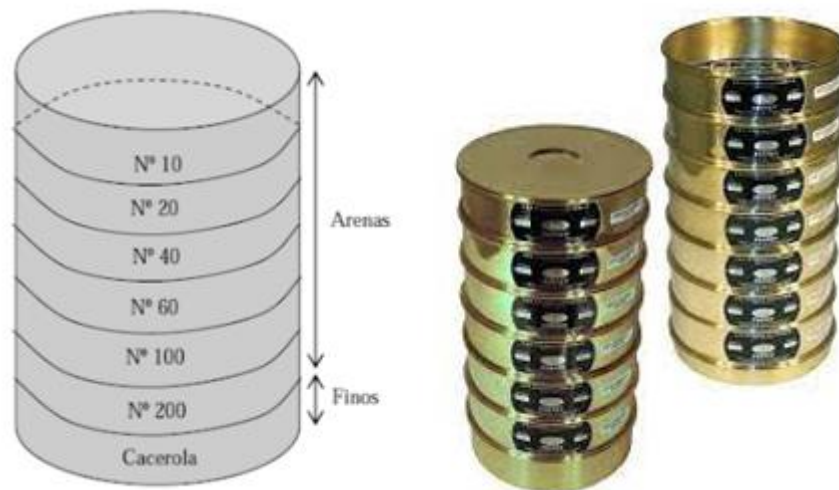


Figura 1.7 Serie de tamices.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis granulométrico obtenido a partir del ensayo por tamizado se puede expresar de dos formas:

- **Analítica:** Mediante tablas que muestra el tamaño de la partícula procesada y el porcentaje de retenido en cada tamiz.
- **Gráfica:** Mediante una curva, cuya abscisa presenta el tamaño o diámetro de apertura de la malla y cuya ordena representa el porcentaje del pasante

acumulado de cada malla empleada. A esta grafica se le conoce como curva granulométrica.

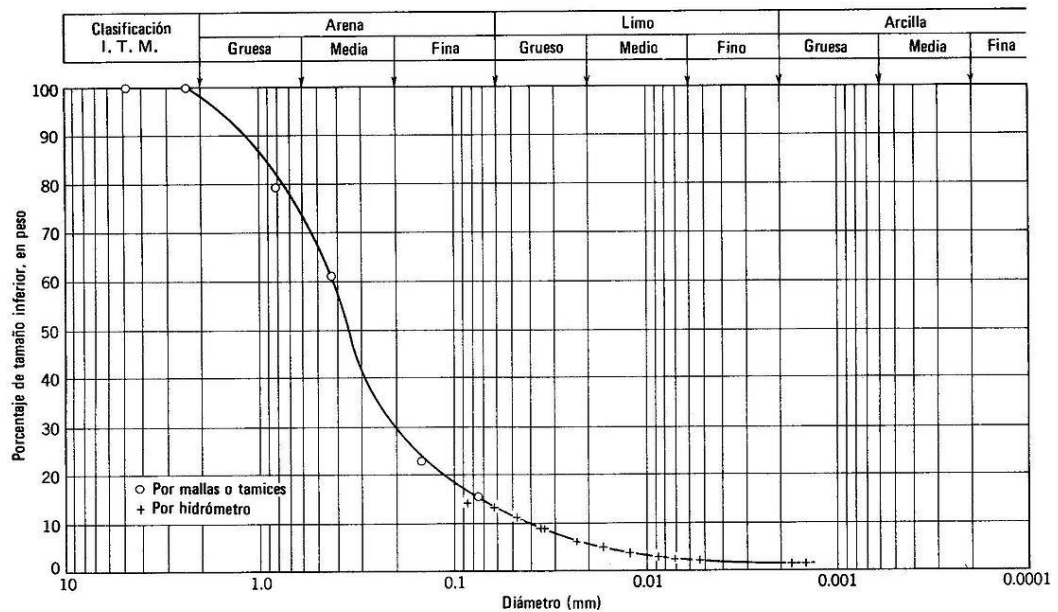


Figura 1.8 Curva granulométrica de un suelo areno-limoso, representado en un papel "log-normal".

Fuente: (Ureña, 2021).

1.6.3. Representación de distribución de tamaño de partículas

Esta representación muestra la fracción en masa o porcentaje de partículas en cada incremento de tamaño como función del tamaño o rango de partícula en el incremento, estos resultados generan histogramas que contienen una curva continua para aproximar la distribución (González, 2017, p. 9).

“Para describir un sistema de partículas con un amplio intervalo de tamaño, se puede especificar a través del uso de funciones de densidad y de distribución. Debido a esto, es necesario usar funciones estadísticas” (Luna, 2016, p.14).

Las funciones de distribución de tamaño más utilizadas son las siguientes:

– **Distribución de Schuhmann**

Este modelo compara los valores del porcentaje acumulado pasante con el tamaño de la partícula. (Tobón, Cerón y Garcés, 2015, p.83). Se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}} \right)^n \quad (11)$$

Donde:

- **F(x):** porcentaje en peso acumulado pasante por malla.
- **x:** tamaño de la partícula
- **Ksch:** constante de Schuhmann
- **n:** parámetro de distribución

– **Distribución de Rosin Rammler**

A través del análisis granulométrico se obtiene el tamaño de partículas y el porcentaje de pasante acumulado, esto se tendrá que ajustar a la distribución de Rosin Rammler que compara los valores del porcentaje acumulado pasante con el tamaño de partícula (Tobón, Cerón y Garcés, 2015, p.83). Se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$F(x) = 1 - e^{-\left\{ \left(\frac{x}{K_{RR}} \right)^m \right\}} \quad (12)$$

Donde:

- **F(x):** % en peso acumulado pasante por cada malla
- **x:** tamaño de partícula
- **K_{RR}:** constante de Rosin Rammler
- **m:** parámetro de distribución

CAPÍTULO 2

EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se explicará de manera detallada las operaciones realizadas para obtener los objetivos propuestos en el trabajo investigativo. Se proporcionará la siguiente información: el número de muestras utilizadas, el proceso de preparación, el índice de carga puntual, la distribución granulométrica y finalmente la correlación entre la distribución granulométrica, con el índice de carga puntual.

2.1. Número de muestras y preparación

Para la realización de este trabajo se analizaron 60 muestras de rocas andesitas obtenidas del sector Cojitambo. Las muestras fueron llevadas a un taller para el trabajo de corte, con el objetivo de obtener 30 muestras con dimensiones de 9 cm x 10 cm x 10 cm, las mismas que se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Medidas Muestras 9x10x10 cm.

Muestras 9x10x10 cm							
# Muestra	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	# Muestra	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	9,99	9,83	8,74	16	10,08	9,09	8,91
2	10,22	9,94	8,81	17	10,04	10,17	8,97
3	9,91	10	9	18	10,01	9,89	8,88
4	9,97	9,98	8,86	19	9,97	10,22	8,88
5	10,14	9,61	9,18	20	9,87	10,14	8,83
6	10,25	9,99	8,84	21	9,74	10,14	8,94
7	10,11	9,9	8,82	22	10,08	9,89	9,01
8	9,94	9,91	9,16	23	10,08	9,94	8,89
9	9,96	10,08	8,83	24	9,9	9,94	8,71
10	10,08	9,81	8,9	25	9,98	9,92	8,81
11	9,91	9,91	8,87	26	9,88	9,95	8,85
12	9,93	9,89	8,82	27	9,86	9,95	8,83
13	9,92	9,94	8,78	28	9,88	9,91	8,94
14	9,86	9,93	8,88	29	9,84	9,93	8,89
15	10,07	10,09	9,04	30	9,91	9,91	8,97

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras fueron enumeradas y en cada una de ellas se midió la altura, la longitud y el ancho con la ayuda de un pie de rey o calibrador.

Se procedió a dividir las muestras en dos grupos iguales, las primeras 30 muestras fueron enviadas al laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil, para el respectivo proceso de compresión uniaxial, mientras que el grupo restante de las otras 30 muestras fueron llevadas al laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas para la realización de los procesos de trituración y clasificación granulométrica.



Figura 2.1 Muestras enviadas al laboratorio de Ingeniería Civil.

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Determinación del índice de carga puntual

Como ya se mencionó anteriormente las primeras 30 muestras fueron llevadas al laboratorio de civil para determinar el índice de carga puntual, en donde se utilizó la máquina de Humboldt de compresión simple, como se observa en la figura 2.2.



Figura 2.2 Puntas cónicas de la prensa Humboldt.

Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de esta máquina se obtuvo el valor de la fuerza con la que se logra romper cada muestra, la cual está en unidades de kilogramos fuerza (kgf). Este valor sirvió para poder determinar la resistencia a la compresión simple.



Figura 2.3 Máquina Humboldt.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Proceso de ruptura de las muestras

Se colocó una por una las 30 muestras con dimensiones de 9 cm x 10 cm x 10 cm en unos moldes metálicos, en el cual se fue adaptando la altura para que la máquina pueda aplicar una fuerza necesaria y logre romper cada una de las muestras.



Figura 2.4 Muestra en las puntas cónicas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.5 Muestra que será sometida a compresión simple.

Fuente: Elaboración propia.

Al momento de escuchar el rompimiento de cada muestra, se detuvo la máquina con la ayuda de una palanca auxiliar que se encuentra al costado de la misma y se obtuvo el valor de la fuerza de cada una de las muestras.

Una vez realizada la ruptura de las 30 muestras con la ayuda de la máquina de Humboldt, se obtuvieron las siguientes fuerzas de cada una de las muestras, las cuales son mostradas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Fuerza de ruptura de Muestras 9x10x10 cm.

Muestras 9x10x10 cm									
# Muestra	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	P (kN)	# Muestra	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	P (kN)
1	9,99	9,83	8,74	24,14	16	10,08	9,09	8,91	32,32
2	10,22	9,94	8,81	25,96	17	10,04	10,17	8,97	32,53
3	9,91	10	9	26,01	18	10,01	9,89	8,88	32,48
4	9,97	9,98	8,86	26,66	19	9,97	10,22	8,88	32,98
5	10,14	9,61	9,18	28,52	20	9,87	10,14	8,83	33,23
6	10,25	9,99	8,84	28,28	21	9,74	10,14	8,94	33,30
7	10,11	9,9	8,82	28,16	22	10,08	9,89	9,01	35,14
8	9,94	9,91	9,16	28,85	23	10,08	9,94	8,89	34,96
9	9,96	10,08	8,83	28,55	24	9,9	9,94	8,71	34,46
10	10,08	9,81	8,9	30,15	25	9,98	9,92	8,81	36,16
11	9,91	9,91	8,87	30,88	26	9,88	9,95	8,85	37,66
12	9,93	9,89	8,82	31,18	27	9,86	9,95	8,83	37,74
13	9,92	9,94	8,78	31,19	28	9,88	9,91	8,94	38,75
14	9,86	9,93	8,88	31,36	29	9,84	9,93	8,89	39,44
15	10,07	10,09	9,04	32,63	30	9,91	9,91	8,97	40,22

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Fórmulas para determinar el índice de carga puntual

En este apartado se especificarán las fórmulas utilizadas para la obtención del I_{s50} , conjuntamente con las fuerzas obtenidas en la máquina de Humboldt.

Primero se realizó el cálculo del diámetro equivalente de cada muestra con la siguiente fórmula:

$$De^2 = \frac{4 \times \text{Área}}{\pi} \quad (13)$$

Donde:

- De^2 : diámetro equivalente.

Después se calculó el I_s en todas las muestras con la siguiente fórmula:

$$I_s = \frac{P}{De^2 \times 10,2 \times 9,81} \quad (14)$$

Donde:

- P: fuerza necesaria para romper la muestra
- De^2 : diámetro equivalente

Finalmente se determinó el $I_s (50)$ de cada muestra utilizando la siguiente fórmula:

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45} \times I_s \quad (15)$$

2.3. Trituración

A partir de la elaboración de las probetas de la roca andesita, se procede a identificar por códigos para el proceso de trituración, que permitirá la posterior clasificación granulométrica de cada muestra seleccionada.

Para el proceso de trituración se utilizaron 30 muestras con las siguientes dimensiones:

Dimensiones: 9 x 10 x 10 cm.



Figura 2.6 Enumeración de las probetas.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las muestras identificadas y enumeradas, se procedió a pesarlas, para determinar el peso inicial de cada muestra y al final del proceso de igual manera se pesó la muestra con la finalidad de establecer la pérdida de material durante la trituración.

Este proceso se llevó a cabo con el empleo de la trituradora de mandíbulas R22 disponible en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas, que permitió la fragmentación y disminución del material para su posterior análisis granulométrico.



Figura 2.7 Peso de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe colocar la muestra dentro de la trituradora de mandíbulas de forma horizontal y a una altura considera como se muestra en la figura 2.8, con el objetivo de evitar posibles accidentes de salida espontánea de material y para obtener una fragmentación lo más homogénea posible.



Figura 2.8 Proceso de trituración.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez trituradas las muestras se obtiene los fragmentos con diferentes tamaños para luego continuar con el proceso de clasificación granulométrica, mediante el empleo de una serie de tamices normalizados.



Figura 2.9 Obtención de los fragmentos de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Determinación de la distribución granulométrica

Para realizar la distribución granulométrica de las 30 muestras de roca andesita se procedió a colocar el material fragmentado en una serie de tamices (TYLER), el juego de tamices está ordenado en orden decreciente.

Para esta distribución granulométrica se utilizó una serie de tamices con las siguientes aberturas:

Tabla 2.3 Abertura de tamices.

# TAMIZ (pulgadas)	MALLA (mm)
3/8	9,5
8	2,36
10	2
16	1,18
20	0,85

Fuente: Elaboración propia.

El primer tamiz es el que posee la malla de apertura de mayor tamaño hasta llegar al último tamiz con malla de apertura de menor tamaño, con esta serie de tamices y conjuntamente con el accionamiento mecánico el material atraviesa la luz de tamiz (apertura) quedando retenido en cada tamiz distintas fracciones de tamaño de partículas.



Figura 2.10 Serie de tamices.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se puede observar los pesos propios de cada tamiz, sin la presencia de material, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 2.4 Peso de los tamices vacíos.

# TAMIZ (pulgadas)	MALLA (mm)	PESO (kg)
3/8	9,5	0,796
8	2,36	0,7273
10	2	0,6532
16	1,18	0,6146
20	0,85	0,6206
Fondo	-	0,5

Fuente: Elaboración propia.

Después de colocar el material triturado se ubica la serie de tamices con el material en el agitador eléctrico por un periodo de 2 minutos, una vez cumplido el periodo de tiempo preestablecido, se procedió a pesar cada tamiz con las partículas retenidas en cada uno de los mismos. En la figura 2.11 se observa el proceso de pesaje de cada tamiz:

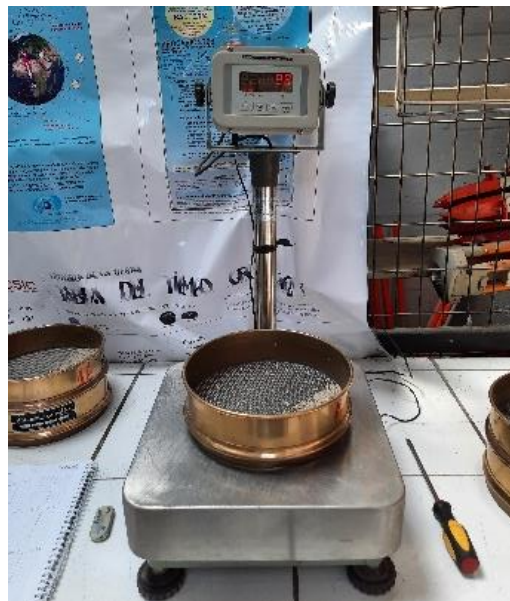


Figura 2.11 Peso de cada tamiz con material.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1. Elaboración de curvas granulométricas

Para la elaboración de las curvas granulométricas, se utilizó el programa Excel, para interpretar los datos obtenidos de las diferentes muestras procesadas. En el Excel se detalló la siguiente información:

- Numero de muestra
- Peso inicial de la probeta (kg)
- Número de tamiz (pulgadas)
- Malla (mm)
- Peso del tamiz sin material (kg)
- Peso del tamiz con material retenido (kg)
- Peso parcial (kg)
- Porcentaje de retenido (%)
- Porcentaje de retenido acumulado (%)
- Porcentaje de pasante acumulado (%)

Una vez digitado y procesado los datos en Excel, se procede a calcular los distintos porcentajes indicados anteriormente mediante las siguientes formulas:

- **Peso parcial (Kg):** Corresponde al peso total del material retenido en cada tamiz, se expresa mediante la siguiente formula.

$$\begin{aligned} & \textit{Peso parcial (Kg)} \\ & = (\textit{Peso del tamiz con material}) - (\textit{Peso del tamiz}) \quad (16) \end{aligned}$$

- **% Retenido:** Corresponde al porcentaje en masa del suelo directamente retenido en el tamiz. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% \textit{ Retenido} = \frac{\textit{Peso parcial}}{\textit{Peso total de la muestra triturada}} * 100 \quad (17)$$

% Retenido acumulado: Corresponde al porcentaje en masa de todas las partículas de mayor tamaño que la abertura, que un determinado tamiz ha retenido (Bustamente & Guillén, 2020).

Se calcula mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \frac{\% \text{ retenido tamiz \#1}}{\% \text{ retenido tamiz \#2}} + \% \text{ retenido tamiz \#3} \quad (18)$$

- **% Pasante acumulado:** Corresponde al porcentaje en masa de todas las partículas de mayor tamaño que la abertura, que un determinado tamiz ha retenido (Bustamente & Guillén, 2020).

Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Pasante acumulado} = 100 - \% \text{ retenido acumulado \#n} \quad (19)$$

Tabla 2.5 Modelo de tabla para el análisis granulométrico.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Muestra							
Peso (kg)							
# Tamiz	Malla (mm)	Peso tamiz (kg)	Peso tamiz y retenido (kg)	Peso parcial (kg)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
3/8	9,5	0,796					
8	2,36	0,7273					
10	2	0,6532					
16	1,18	0,6146					
20	0,85	0,6206					
FONDO		0,5					
TOTAL							

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado los cálculos indicados en la tabla 2.5 se determinará la curva granulométrica cuya abscisa representa el tamaño o diámetro de apertura de la malla y cuya ordenada representa el porcentaje del pasante acumulado de cada malla empleada.

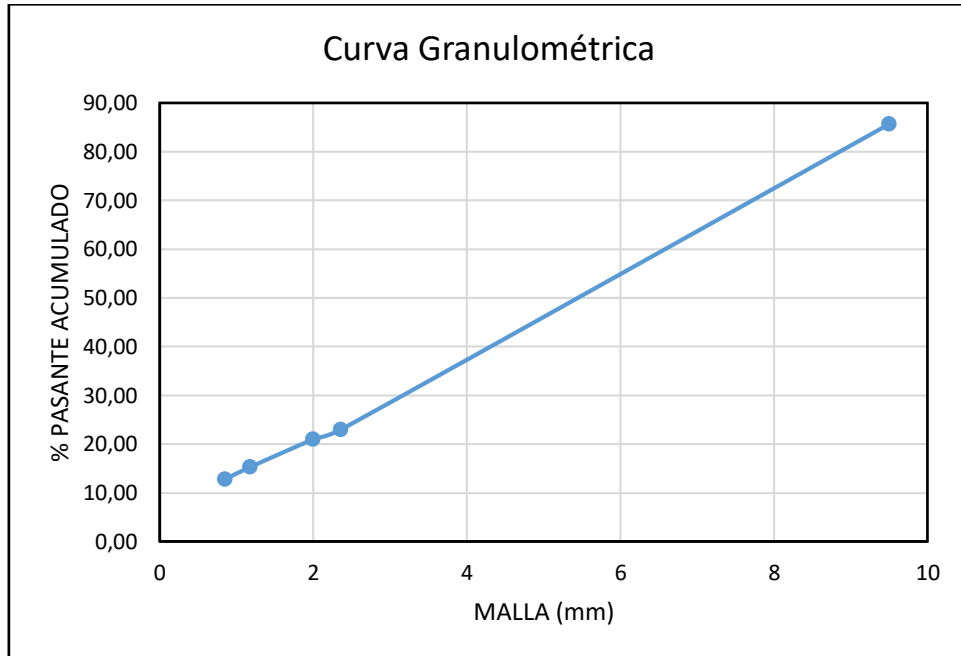


Figura 2.12 Curva granulométrica de la muestra 1T9.

Fuente: Elaboración propia.

Después de haber obtenido estos resultados se procedió a trabajar con un modelo estadístico conocido como el modelo de Schumann para calcular el d_{80} .

Este modelo compara los valores del porcentaje acumulado pasante con el tamaño de la partícula. (Tobón, Cerón y Garcés, 2015, p.83).

Se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}} \right)^n \quad (20)$$

Donde:

- $F(x)$: porcentaje en peso acumulado pasante por malla
- x : tamaño de la partícula
- K_{sch} : constante de Schumann
- n : parámetro de distribución

Para utilizar el método de Schumann se grafica los valores de la tabla 2.6.

Mediante los resultados obtenidos de la gráfica se realizará una linealización del tramo recto de la gráfica empleando la ecuación de la recta.

$$y = mx + b \quad (21)$$

Para la interpretación del método de Schuhmann se trabajará la ecuación 20, despejando convenientemente y utilizando logaritmos en ambos miembros de la ecuación como se presenta a continuación:

$$\text{Log } F(x) = \text{Log} \left(\frac{x}{K_{sch}} \right)^n \quad (22)$$

$$\text{Log } F(x) = n \text{Log} (x) - n \text{Log} (K_{sch}) \quad (23)$$

Tabla 2.6 Método de Schuhmann de la muestra 1T9.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Muestra			1T9			Schuhmann	
Peso (kg)			2,059			X	Y
# Tamiz	Malla (um)	Peso parcial (kg)	% Retenido	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	Log (x)	Log F(x)
+3/8	9500	0	0	1	0	3,97772	0
-3/8 + 8	9500	285	0,142907	1	0	3,97772	0
-8 + 10	9500	1250,7	0,627137	0,85709271	0,1429	3,97772	-0,06697
-10 + 16	2360	39,8	0,019956	0,22995537	0,7700	3,37291	-0,63835
-16 + 20	2000	113,4	0,056862	0,2099985	0,7900	3,30103	-0,67778
-20	1180	50,4	0,025272	0,15313644	0,8469	3,07188	-0,81492
FONDO	850	255	0,127864	0,12786441	0,8721	2,92942	-0,89325
TOTAL		1994,3	1	0	1		

Fuente: Elaboración propia.

Para la elaboración de la curva granulométrica que permitirá determinar el método de Schuhmann, se utilizarán los datos obtenidos de los logaritmos, cuya abscisa representa el logaritmo del tamaño o diámetro de apertura de la malla [Log (x)] y cuya ordenada representa el logaritmo del porcentaje del pasante acumulado [Log F(x)].

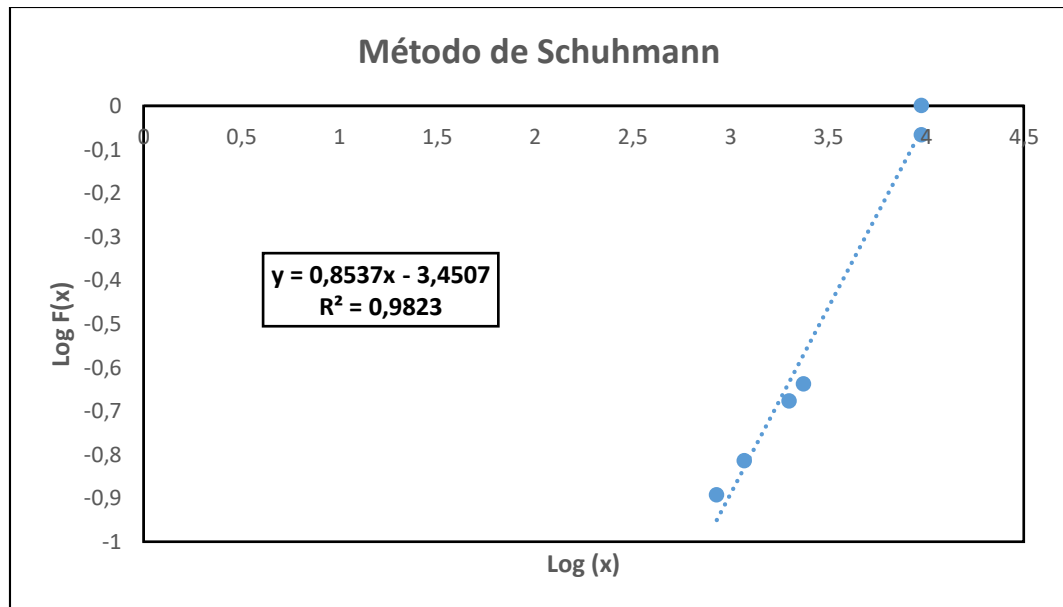


Figura 2.13 Curva granulométrica del método de Schuhmann de la muestra 1T9.

Fuente: Elaboración propia.

De esta aproximación se obtiene los valores de n y (K_{sch}) .

$$\text{Log } F(x) = 0,8537 \text{ Log } (x) - 3,4507 \quad (24)$$

Donde:

- n : pendiente de la sección lineal [0,8537].
- $n \text{ Log } (K_{sch})$: Logaritmo de la constante de Schuhmann o tamaño máximo de distribución [3,4507].

$$K_{sch} = 10^{\frac{3,4507}{n}} = 10^{\frac{3,4507}{0,8537}} = 11016,71826 \mu\text{m} \quad (25)$$

De esta manera se define el modelo de Schuhmann como:

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}} \right)^n = \left(\frac{x}{11016,71826} \right)^{0,8537} \quad (26)$$

2.4.2. Determinación del d(80) de alimento

Después, de haber determinado el modelo de Schuhmann procedemos a calcular el d

$$(80) \text{ para cada muestra. } 0,8 = \left(\frac{x}{11016,71826} \right)^{0,8537} \quad (27)$$

$$0,7699 = \frac{x}{11016,71826}$$

$$x = 8483 \mu m = 8,483 mm$$

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se detallarán los resultados obtenidos en los ensayos de carga puntual y en el de la distribución granulométrica, para posteriormente determinar la manera en que se relaciona el índice de carga puntual de las rocas, con la distribución del tamaño de partículas de las mismas. Para la realización de estos ensayos se utilizaron los siguientes equipos:

- Una trituradora de mandíbulas R22
- Una serie de tamices
- Por último, la máquina Humboldt

Las muestras utilizadas para estos ensayos pertenecen a la zona de Cojitambo, se trabajó con 180 muestras, las cuales tuvieron diferentes dimensiones.

3.1. Análisis de resultados del índice de carga puntual en roca

En esta etapa de estudio, se utilizaron 30 muestras con distintas dimensiones, las 30 primeras muestras eran de 5 cm x 10 cm x 10 cm, las otras 30 fueron de 7 cm x 10 cm x 10 cm y las últimas 30 con dimensiones de 9 cm x 10 cm x 10 cm, las cuales fueron sometidas a ensayos de carga puntual, para determinar el índice de resistencia de cada una de las muestras.

Como ya se mencionó y detalló en el capítulo anterior, primero se procedió a calcular el diámetro equivalente con la siguiente fórmula:

$$De^2 = \frac{4 \times \text{Área}}{\pi} \quad (28)$$

Después se realizaron los cálculos para determinar el índice de resistencia de cada una de las muestras utilizando la siguiente fórmula:

$$I_s = \frac{P}{De^2 \times 10,2 \times 9,81} \quad (29)$$

Por último se determinó el I_s (50) de las 90 muestras mediante la siguiente fórmula:

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45} \times I_s \quad (30)$$

Una vez realizado todos los cálculos necesarios, se obtienen los siguientes resultados detallados en las siguientes tablas.

Tabla 3.1 Resultados $I_s(50)$ Muestras 9x10x10 cm.

Muestras 9x10x10 cm								
# Muestra	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Z/X	P (kN)	De² (mm²)	Is (MPa)	I s (50) (MPa)
1	9,99	9,83	8,74	0,87	24,14	11116,98	2,17	3,04
2	10,22	9,94	8,81	0,86	25,96	11464,02	2,26	3,19
3	9,91	10	9	0,91	26,01	11356,02	2,29	3,22
4	9,97	9,98	8,86	0,89	26,66	11247,06	2,37	3,32
5	10,14	9,61	9,18	0,91	28,52	11851,98	2,41	3,42
6	10,25	9,99	8,84	0,86	28,28	11536,82	2,45	3,46
7	10,11	9,9	8,82	0,87	28,16	11353,50	2,48	3,49
8	9,94	9,91	9,16	0,92	28,85	11592,90	2,49	3,51
9	9,96	10,08	8,83	0,89	28,55	11197,73	2,55	3,57
10	10,08	9,81	8,9	0,88	30,15	11422,49	2,64	3,71
11	9,91	9,91	8,87	0,90	30,88	11191,99	2,76	3,87
12	9,93	9,89	8,82	0,89	31,18	11151,36	2,80	3,91
13	9,92	9,94	8,78	0,89	31,19	11089,61	2,81	3,93
14	9,86	9,93	8,88	0,90	31,36	11148,08	2,81	3,94
15	10,07	10,09	9,04	0,90	32,63	11590,66	2,82	3,98
16	10,08	9,09	8,91	0,88	32,32	11435,32	2,83	3,98
17	10,04	10,17	8,97	0,89	32,53	11466,64	2,84	3,99
18	10,01	9,89	8,88	0,89	32,48	11317,67	2,87	4,03
19	9,97	10,22	8,88	0,89	32,98	11272,45	2,93	4,11
20	9,87	10,14	8,83	0,89	33,23	11096,55	2,99	4,19
21	9,74	10,14	8,94	0,92	33,30	11086,81	3,00	4,20
22	10,08	9,89	9,01	0,89	35,14	11563,66	3,04	4,29
23	10,08	9,94	8,89	0,88	34,96	11409,65	3,06	4,31
24	9,9	9,94	8,71	0,88	34,46	10979,02	3,14	4,38
25	9,98	9,92	8,81	0,88	36,16	11194,81	3,23	4,53
26	9,88	9,95	8,85	0,90	37,66	11132,95	3,38	4,73
27	9,86	9,95	8,83	0,90	37,74	11085,31	3,40	4,76
28	9,88	9,91	8,94	0,90	38,75	11246,17	3,45	4,83
29	9,84	9,93	8,89	0,90	39,44	11137,99	3,54	4,96
30	9,91	9,91	8,97	0,91	40,22	11318,17	3,55	4,99

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Caracterización de la distribución granulométrica del material

Inicialmente en este análisis, se realizaron los procesos de trituración empleando la trituradora de mandíbulas R22 del laboratorio de minas de la Universidad del Azuay. Luego de haber sido expuesta las 30 muestras a trituración, se procede a las pruebas de clasificación granulométrica, utilizando una serie de tamices accionados durante 2 minutos por la tamizadora eléctrica. Para esta distribución granulométrica se utilizó una serie de tamices con las siguientes aberturas:

Tabla 3.2 Abertura de tamices.

# TAMIZ (pulgadas)	MALLA (mm)
3/8	9,5
8	2,36
10	2
16	1,18
20	0,85

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se puede observar los valores de la clasificación granulométrica de una de las muestras de las 30 que fueron analizadas en el laboratorio:

Tabla 3.3 Clasificación granulométrica de la muestra 1T9.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
MUESTRA				1T9			
PESO (kg)				2,059			
# Tamiz	Malla (mm)	Peso tamiz (kg)	Peso tamiz y retenido (kg)	Peso parcial (kg)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
3/8	9,5	0,796	1,081	0,285	14,29	14,29	85,71
8	2,36	0,7273	1,978	1,2507	62,71	77,00	23,00
10	2	0,6532	0,693	0,0398	2,00	79,00	21,00
16	1,18	0,6146	0,728	0,1134	5,69	84,69	15,31
20	0,85	0,6206	0,671	0,0504	2,53	87,21	12,79
FONDO		0,5	0,755	0,255	12,79	100,00	0,00
TOTAL				1,99	100,00		

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se puede observar la representación gráfica de la curva granulométrica del material rocoso proveniente de la mina ubicada en el sector de Cojitambo.

La curva se encuentra representada de la siguiente manera:

Abscisa representa el tamaño o diámetro de apertura de la malla.

Finalmente, la ordenada representa el porcentaje del pasante acumulado de cada malla empleada.

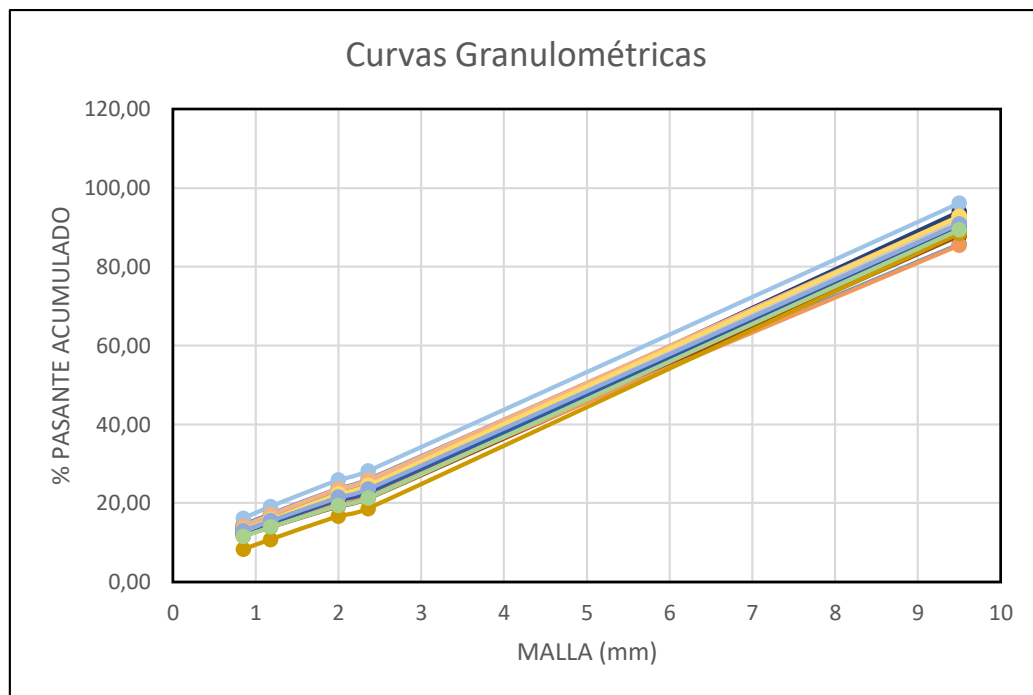


Figura 3.1 Curvas granulométricas de las 30 muestras del material rocoso.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.1 representa las curvas granulométricas de las 30 muestras del material rocoso andesita proveniente de la mina ubicada en el sector de Cojitambo perteneciente a la ciudad de Azogues, provincia del Cañar.

3.2.1. Análisis de resultados de modelos de distribución

Modelo de distribución Schuhmann, estimación del d(80)

A partir de los obtenidos del Excel se procederá a trabajar con un modelo estadístico conocido como el modelo de Schumann para calcular el d80 de cada muestra. En la siguiente tabla se puede apreciar la estimación del modelo de Schuhmann de una de las muestras:

Tabla 3.4 Método de Schuhmann de la muestra 1T9.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
MUESTRA PESO (kg)			1T9			Schuhmann	
			2,059			X	Y
# Tamiz	Malla (um)	Peso parcial (kg)	% Retenido	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	Log (x)	Log F(x)
+3/8	9500	0	0	1	0	3,97772	0
-3/8 + 8	9500	285	0,142907	1	0	3,97772	0
-8 + 10	9500	1250,7	0,627137	0,85709271	0,1429	3,97772	-0,06697
-10 + 16	2360	39,8	0,019956	0,22995537	0,7700	3,37291	-0,63835
-16 + 20	2000	113,4	0,056862	0,2099985	0,7900	3,30103	-0,67778
-20	1180	50,4	0,025272	0,15313644	0,8469	3,07188	-0,81492
FONDO	850	255	0,127864	0,12786441	0,8721	2,92942	-0,89325
TOTAL		1994,3	1	0	1		

Fuente: Elaboración propia.

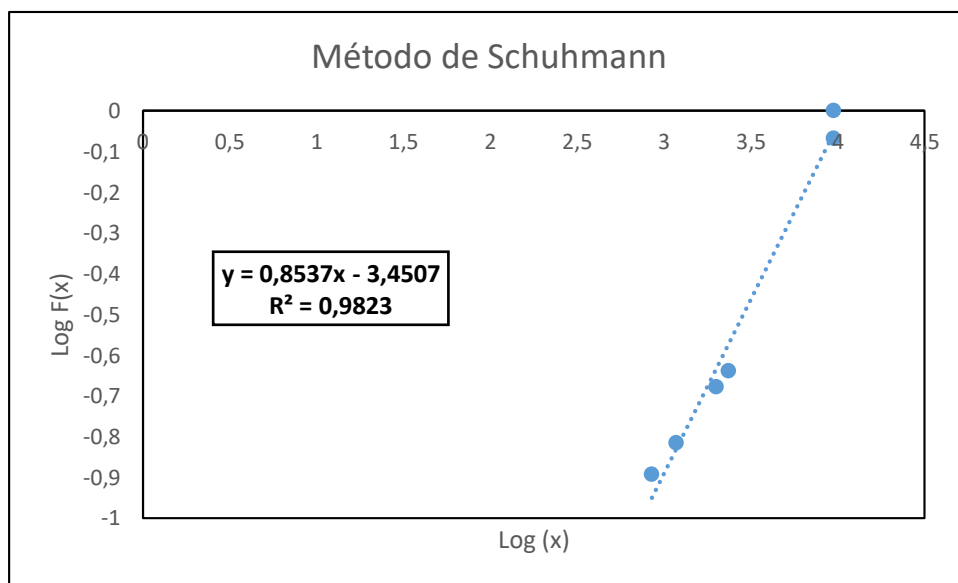


Figura 3.2 Curva granulométrica del método de Schuhmann de la muestra 1T9.

Fuente: Elaboración propia.

De esta aproximaci3n se obtiene los valores de n y (K_{sch}) .

$$\text{Log } F(x) = 0,8537 \text{ Log } (x) - 3,4507 \quad (31)$$

Donde:

- n : pendiente de la secci3n lineal [0,8537].
- $n \text{ Log } (K_{sch})$: Logaritmo de la constante de Schuhmann o tama1o m3ximo de distribuci3n [3,4507].

$$K_{sch} = 10^{\frac{3,4507}{n}} = 10^{\frac{3,4507}{0,8537}} = 11016,71826 \mu m \quad (32)$$

De esta manera se define el modelo de Schuhmann como:

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}} \right)^n = \left(\frac{x}{11016,71826} \right)^{0,8537} \quad (33)$$

A partir de los c3lculos indicados anteriormente, se procedi3 a estimar el $d(80)$ de las 30 muestras. En la tabla 3.7 se presentar3 el $d(80)$ de las 30 muestras enumeradas.

Tabla 3.5 Determinaci3n del d(80) de las 30 muestras de material rocoso.

DETERMINACI3N DEL d(80) DE CADA MUESTRA			
Muestra	d(80)	Muestra	d(80)
1T9	8,483	16T9	8,194
2T9	8,509	17T9	8,158
3T9	8,478	18T9	8,146
4T9	8,452	19T9	8,132
5T9	8,386	20T9	8,125
6T9	8,370	21T9	8,107
7T9	8,338	22T9	8,095
8T9	8,316	23T9	8,082
9T9	8,255	24T9	8,041
10T9	8,254	25T9	8,038
11T9	8,236	26T9	8,036
12T9	8,221	27T9	8,033
13T9	8,218	28T9	7,98
14T9	8,217	29T9	7,957
15T9	8,205	30T9	7,698

Fuente: Elaboraci3n propia.

3.3. Interpretaci3n y an3lisis de los datos obtenidos

Correlaci3n entre la distribuci3n granulometr3a con el 3ndice de carga puntual $I_{s(50)}$ del material rocoso.

Para determinar la correlaci3n entre la distribuci3n granulom3trica con el 3ndice de carga puntual $I_{s(50)}$ del material rocoso andesita nos basamos en los datos obtenidos de los:

- Ensayos de carga puntual $I_{s(50)}$ de las 30 muestras analizadas.
- Ensayos de distribuci3n granulom3trica d(80) de las 30 muestras analizadas.

Es importante mencionar que los 30 datos del $I_{s(50)}$ est3n ordenados de forma decreciente de mayor a menor y los 30 datos del d(80) est3n ordenados de forma de creciente de menor a mayor.

Tabla 3.6 Datos obtenidos del índice de carga puntual Is (50) y el d(80).

MUESTRA	d(80)	Is(50)	MUESTRA	d(80)	Is (50)
1T9	7,698	4,992	16T9	8,205	3,976
2T9	7,957	4,956	17T9	8,217	3,937
3T9	7,98	4,833	18T9	8,218	3,933
4T9	8,033	4,760	19T9	8,221	3,914
5T9	8,036	4,733	20T9	8,236	3,865
6T9	8,038	4,526	21T9	8,254	3,715
7T9	8,041	4,379	22T9	8,255	3,572
8T9	8,082	4,311	23T9	8,316	3,514
9T9	8,095	4,289	24T9	8,338	3,486
10T9	8,107	4,200	25T9	8,370	3,458
11T9	8,125	4,187	26T9	8,386	3,415
12T9	8,132	4,106	27T9	8,452	3,324
13T9	8,146	4,031	28T9	8,478	3,220
14T9	8,158	3,996	29T9	8,483	3,190
15T9	8,194	3,979	30T9	8,509	3,037

Fuente: Elaboración propia.

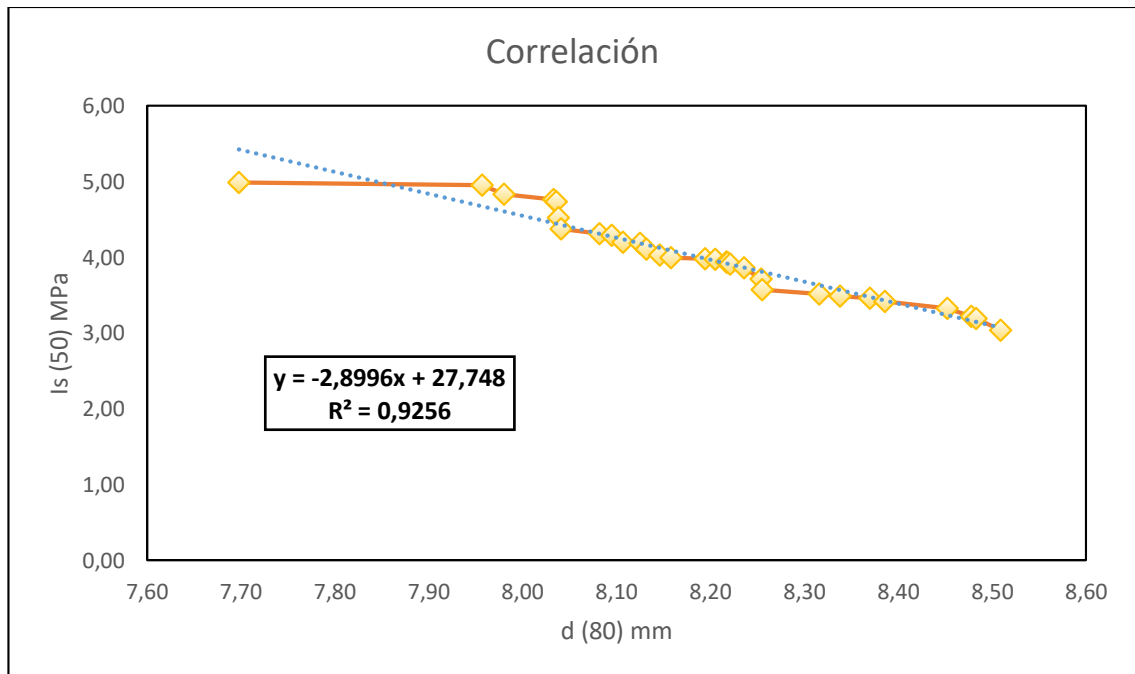


Figura 3.3 Correlaci3n entre el 3ndice de carga puntual $I_s(50)$ y el d_{80} .

Fuente: Elaboraci3n propia.

La correlaci3n viene dada por el m3todo de m3nimos cuadrados, para ello es necesario trazar una recta entre los puntos dados, buscando obtener una funci3n continu3a aproximada de los datos proporcionados, esta funci3n est3 validada por el R^2 , que indica que mientras el valor sea lo m3s cercano a 1 ser3 mejor la correlaci3n como se observa en la figura 3.3.

Adem3s se concluye de la gr3fica de la correlaci3n entre el 3ndice de carga puntual $I_s(50)$ y el $d(80)$ de las 30 muestras, que mientras mayor es el $d(80)$, el $I_s(50)$ disminuye y viene dado por la siguiente ecuaci3n $y = -2,8996x + 27,748$ donde el:

- $d(80)$ est3 entre los valores de [7,698 y 8,509].
- el $I_s(50)$ est3 entre los valores de [3,037 y 4,992].

$$I_s(50) = -2,8996 d_{80} + 27,748$$

Por lo tanto, la formula ayuda a que el proceso sea eficiente ya que permite ahorrar tiempo y disminuir costos, puesto que, con la correlaci3n obtenida se podr3a tambi3n facilitar el trabajo a los mineros, al poner a disposici3n la maquinaria adecuada que posee la mina para desarrollar el proceso de trituraci3n, clasificaci3n granulom3trica

y determinar el d_{80} con mayor facilidad. Con este valor ya se puede utilizar la fórmula de correlación obtenida para determinar el índice de Point Load Test I_s (50).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Esta investigación presenta una alternativa beneficiosa para el desarrollo de proyectos mineros, en donde se puede obtener la caracterización del material rocoso mediante su resistencia, a través de la correlación entre el $d(80)$ y el Índice de Point Load Test $I_s(50)$, sin necesidad de enviar muestras al laboratorio.
- Como resultado de los ensayos, la roca andesita proveniente del sector de Cojitambo tiene un valor de índice de carga puntual entre 3.037 MPa y 4.992 MPa, con esto se puede concluir que el valor de la resistencia a la compresión simple del material rocoso oscila entre 69.9 MPa y 114.8 MPa.
- La metodología planteada en esta investigación, nos ha dado una adecuada caracterización del macizo rocoso, evitando que algún cambio pueda generar datos erróneos y conllevando a resultados no deseados.
- Para obtener el **$I_s(50)$** (Índice de carga puntual) el cual determina la resistencia a compresión simple de la roca se obtuvo la ecuación $I_s(50) = -2,8996 d_{80} + 27,748$ que proviene de la correlación de los datos recopilados de las muestras procesadas en la presente investigación en donde el d_{80} es el tamaño nominal de malla que pasa el 80% de partículas. A su vez se obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9256$, este se encuentra dentro del rango de aceptación, lo cual aprueba la correlación establecida.
- Los equipos utilizados en esta investigación fueron los adecuados y aptos para los ensayos de carga puntual y distribución granulométrica. Es por ello que se han obtenido resultados favorables que han confirmado nuestra alternativa, como una buena opción para encontrar la resistencia a la compresión simple de la roca.

Recomendaciones

- Antes de realizar cualquier ensayo se debe verificar que cada probeta de material rocoso cumpla con las condiciones preestablecidas, es decir que todas las muestras cuenten con las mismas medidas y también que las mismas no tengan ningún tipo de alteración.
- La metodología se debe cumplir a cabalidad y sin descuidar ningún paso. Esto es muy importante para el cálculo de las variables.
- Es importante comprender el funcionamiento de cada equipo del laboratorio, para su correcto uso durante los ensayos y así evitar posibles accidentes.
- Al realizar los ensayos de índice de carga puntual las pruebas deben estar totalmente paralelas con las placas del equipo, debido a que, al momento de aplicar la fuerza, esta se produce en el área de contacto.
- En los ensayos de trituración mediante la trituradora de mandíbulas R22 las probetas se deben colocar de forma horizontal y a una altura considerable, con el objetivo de evitar posibles accidentes de salida espontánea de material y para obtener una fragmentación lo más homogénea posible.
- Es importante indicar que la ecuación planteada es exclusiva para el material rocoso del sector de Cojitambo, pero la metodología utilizada puede generar nuevas ecuaciones para otras zonas de estudio, siempre y cuando se mantengan las condiciones básicas.
- Una mayor precisión a los valores de resistencia a la compresión se puede lograr si se trabaja con mayor cantidad de probetas, en donde el R^2 sea más cercano a 1, esto implica un gasto adicional al proyecto pero garantiza mejores resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrientos Figueredo, Y. (2017). Caracterización granulométrica de dos muestras de colas níquelíferas por sedimentación y por el método del tamiz. *DSpace@UCLV: Repositorio Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV)*.
<https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/8116>
- Bedoya, A. (1961). *El Cojitambo*. Quito: Casa de la Cultura Ecuatoriana.
- Burbano, D., & García, T. (2016). Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras). *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 1(2), 13-16.
<https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.862>
- Bustamente, L., & Guillén, C. (2020). Obtenido de Análisis de la granulometría fina y su relación con la resistencia a compresión simple en rocas:
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10414/1/16041.pdf>
- Canoba, C., & Fraga, H. (2004). Obtenido de PROPIEDADES ELASTICAS DE LAS ROCAS:
https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Elasticidad_de_rocas.pdf
- Feijoo Calle, E. P., & Padrón Suárez, J. (2020). La resistividad de las rocas y su relación con la resistencia a la compresión no confinada en una mina. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 24(99), 61-67.
<https://www.uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/296>
- Galván Ceballos, M. A. (2015). *Mecánica de Rocas. Correlación entre la Resistencia a Carga Puntual y la Resistencia a Compresión Simple*. Cali, Colombia.
- Galván-Ceballos, M., & Restrepo, I. A. (2016). Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en. *DYNA*, 83(198), 9-15. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n198.53151>
- Gonzaga, M. (2018). Obtenido de EVOLUCIÓN TECTONO-SEDIMENTARIA DE LA CUENCA MIOCÉNICA DE CUENCA:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19158/1/CD-8539.pdf> González

- Garcés, J. (2017). *RiuNet: Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Valencia*. <http://hdl.handle.net/10251/85416>
- Iñiguez, D. (2020). Obtenido de Velocidad de Corte en Rocas y su relación con la Resistencia a la Compresión Simple: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9967/1/15597.pdf>
- Linan, C. (1994). *Manual de perforación y voladura de rocas*. España.
- Luna Méndez, E. A. (2016). Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay. *Dspace Repositorio Institucional de la Universidad del Azuay*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6351>
- M, B., & N, A. (1961). El cojitambo. *Editorial casa de la cultura ecuatoriana*, 293., 293.
- Perez Pinto, V. (01 de Diciembre de 2015). *slideshare*. Obtenido de slideshare: <https://es.slideshare.net/vapp05/materiales-y-sus-propiedades-victor-pdf>
- Quevedo Flores, J. L., & Reyes Tinoco, J. A. (2019). Construcción de la “Máquina de Franklin”, pruebas y correlación con ensayos de laboratorio en compresión de rocas. *Dspace Repositorio Institucional de la Universidad del Azuay*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8954>
- Rodriguez, F. J. (2010). Propiedades disicas: densidad y porosidad . *Departamento de Geología* .
- Roura, M. (2010). Obtenido de Estudio geológico - geotécnico de la inestabilidad del suelo que afecta al Complejo Arqueológico Cojitambo, estabilización y medidas de mitigación: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2523>
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la tierra .
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra Una Introduccion a la Geología Física*.
- Tobón Arroyave, N., Cerón, A. F., & Garcés Giraldo, L. F. (2015). Análisis y modelamiento de la granulometría en la cáscara del café (*Coffea arabica* L.)

variedad Castillo. *P+L: Producción + Limpia*, 10(2), 80-91.
doi:10.22507/pml.v10n2a7

Torrija, J., & Franch, J. (2008). *Fundamentos Basicos de Geotecnia*. Valencia.

Ureña, C. (2021). Caracterización del material rocoso mediante granulometría e índice de carga puntual. *Dspace Repositorio Institucional de la Universidad del Azuay*. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10802/1/16345.pdf>

Verdezoto, K. (2020). Obtenido de Caracterización de material rocoso mediante ensayos físicos de campo: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10037/1/15667.pdf>

Verdezoto, P. (Noviembre de 2006). Obtenido de LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO DEL SECTOR COMPRENDIDO ENTRE LAS LATITUDES 2° 37' S Y 2° 50' S, PROVINCIAS DE CAÑAR Y AZUAY, CON ESPECIAL ENFOQUE SOBRE LAS SECUENCIAS MIOCÉNICAS : https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-12/010041249.pdf

Viggiano-Guerra, J. (2015). *Propiedades Ingenieriles de las Rocas*. Morelia.